

## 하상퇴적토층에 관입된 개단강관말뚝의 축하중 전이 거동

### Behavior of Axial Load Transfer for Open-ended Steel Pipe Pile in Alluvial Deposits

김상현<sup>1)</sup>, Sanghyun Kim, 성인출<sup>2)</sup>, Inchool Sung, 정창규<sup>3)</sup>, Changkyu Jung,  
김명학<sup>4)</sup>, Myunghak Kim, 최용규<sup>5)</sup>, Yongkyu Choi

- 1) 인제대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Inje Univ.
- 2) 경성대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Kyungshing Univ.
- 3) 부산광역시 건설본부 교량건설 1과장, Manager, Construction Headquarter, Pusan Metropolitan City
- 4) 인제대학교 토목공학과 조교수, Assist. Prof., Dept. of Civil Eng., Inje Univ.
- 5) 경성대학교 건설·환경공학부 부교수, Assoc. Prof., Dept. of Civil & Envir. Eng., Kyungshing Univ.

**개요(SYNOPSIS)** : In this study, static pile load tests and PDA for open-ended steel pipe pile( $\varnothing = 609.6$  mm,  $t = 14$  mm) penetrated into the gravel layer(GP - GM) was accomplished and axial load distribution was measured. Based on the tests results, the ultimate bearing capacity and axial load bearing mode were examined. Also, the ultimate pile capacity was calculated by APILE<sup>PLUS</sup>.

**주요어(Key words)** : axial load distribution, open-ended steel pipe pile, gravel layer, static pile load test, PDA, APILE<sup>PLUS</sup>

## 1. 서론

○○센텀시티 지하차도 건설공사 현장에서 실시된 하중전이 측정이 수반된 말뚝정재하시험 결과를 분석하였으며, PDA는 정재하시험에서 반력말뚝으로 사용된 말뚝들의 인발저항력을 예측하기 위하여 실시하였다. 또한, 시험말뚝에 대한 정재하시험을 실시하기 전에 시험말뚝의 지지력을 개략적으로 추정하기 위하여 PDA를 실시하였다.

본 연구에서는 말뚝선단부를 흔히 생각하고 있는 견고한 지지층인 암반층(풍화암, 연암, 경암)이 아닌 자갈층(GP - GM)에 항타관입시킨 개단강관말뚝( $\varnothing = 609.6$  mm,  $t = 14$  mm)에 대하여 하중전이 측정이 수반된 정재하시험과 PDA를 수행하였다. 이를 통하여 말뚝의 극한(또는 항복)지지력을 예측하였으며, 말뚝의 연직지지력 해석코드인 APILE<sup>PLUS</sup>를 이용하여 말뚝의 지지력을 계산하였다. 그리고, 선단지지력과 주변마찰력을 분리하여 축하중전이 거동을 분석하였다.

## 2. 시험말뚝의 제원 및 지반조건

본 재하시험은 2개소에서 실시되었다. 즉, TP1(시점부 인근 집수정, No. 268)과 TP2(종점부 인근 집

수정, No. 313)에서 실시하였으며, 시험말뚝의 제원은 표 1과 같다.

표 1. 시험말뚝의 제원 요약

시험말뚝 기호		TP1	TP2
시험 위치		시점부 인근 집수정 No. 268	종점부 인근 집수정 No. 313
말뚝 형식		개 단 강 관 말뚝	
말뚝 제원	직경(mm)	609.6	
	두께(mm)	14	
	길이(m)	24.5	23.3
설계하중(ton)		250	
최대작용하중(ton)		830	710
하중재하수단		본말뚝(Ø = 609.6 mm) 8개의 인발저항력	
비 고		축하중 계측용 센서 설치	

시험말뚝에는 각 지층의 하중 지지 거동을 측정하기 위하여 축하중 계측용 센서를 설치하였으며, TP1과 TP2의 센서 설치 위치를 그림 1에 나타내었다.

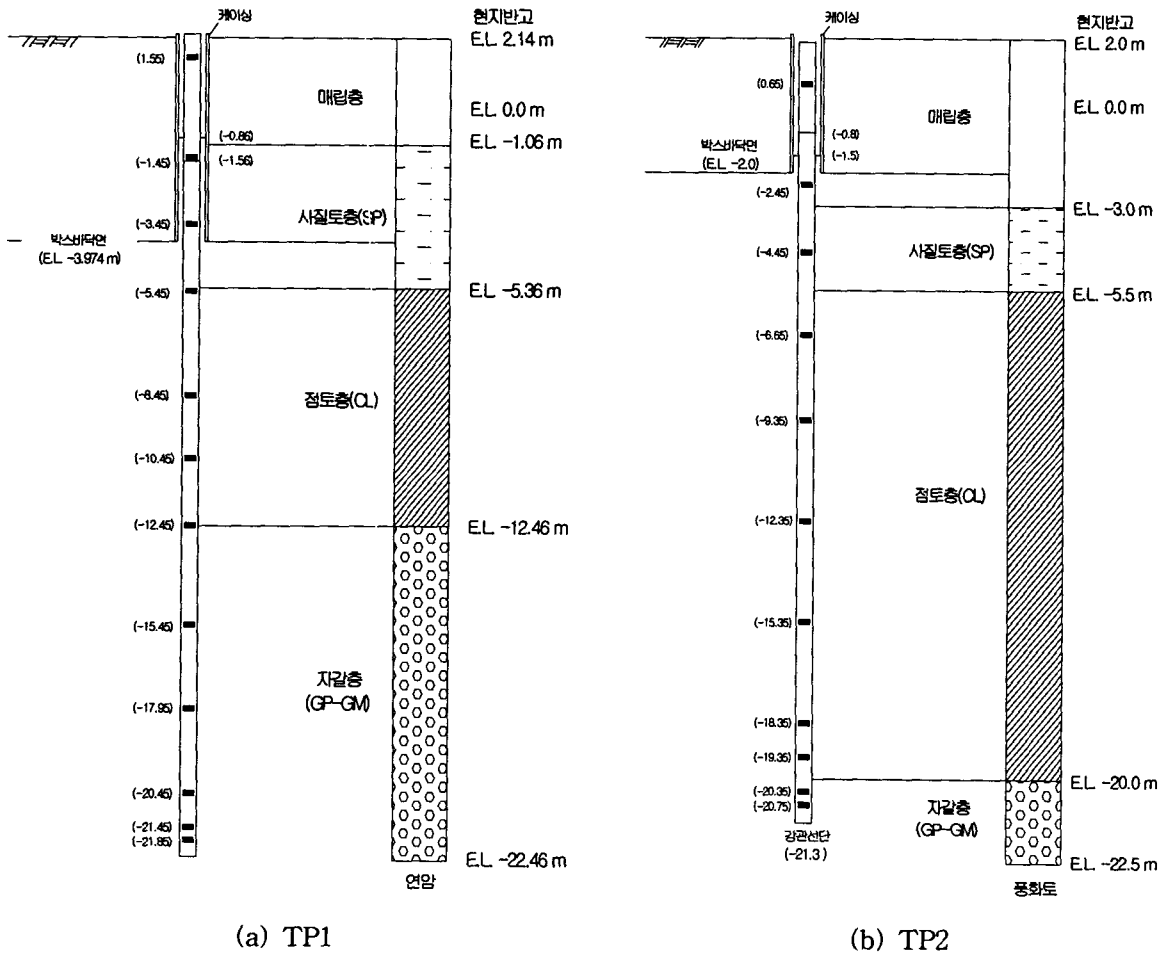


그림 1. 지층구분 및 시험말뚝 센서설치 위치도

말뚝부재에 발생되는 축하중을 측정하기 위하여 설치한 축하중 계측용 센서는 경성대학교 지반공학 연구실에서 개발한 강관말뚝 표면에 직접 부착하는 완전결선형 전기저항식 강관변형률계(현재 특허출원

층(출원번호 : 1100519140723))를 설치하였으며, 설치 위치와 수량은 시험말뚝의 길이와 지반조건 등을 감안하여 변화시켰다.

지반조사결과에 의하면, 지층은 상부로부터 세립 ~ 조립질의 모래층, 실트층(ML), 자갈층(GP GM), 연암층으로 구성되었다.

심도에 따른 표준관입시험의 N값의 변화를 그림 2에 나타내었다.

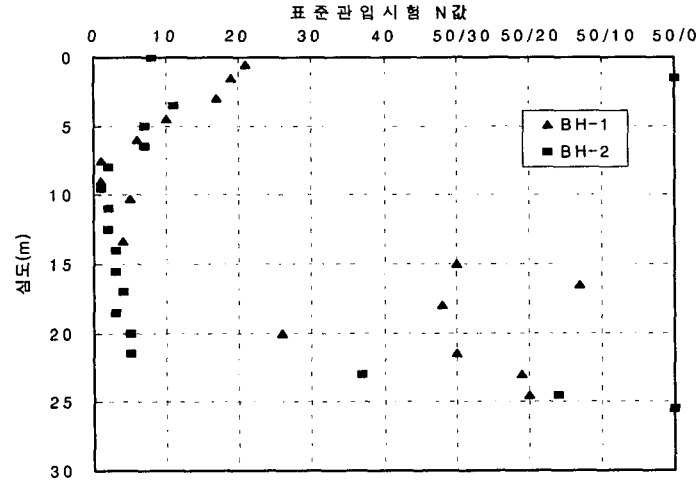


그림 2. 심도에 따른 N값의 변화

### 3. 말뚝정재하시험 및 하중전이 측정

#### 3.1 말뚝정재하시험 개요

개정된 도로교 설계기준 (건설교통부, 2000)에서는 말뚝기초의 설계는 “예비설계, 검증시험, 예비설계의 보완”의 절차를 거쳐 수행하도록 규정하였다. 또한, 외말뚝의 허용연직지지력은 지반의 허용지지력과 말뚝재료의 허용하중을 비교하여 낮은 값으로 결정하도록 하였다. 여기서, 지반의 허용지지력은 지반의 극한지지력에 소정의 안전율을 적용하여 결정하도록 하였다. 지반조건에 따라 결정되는 말뚝기초의 극한지지력은 대표적인 지반조건에 설치된 실물크기 말뚝이나 축소말뚝에 대한 연직정재하시험을 수행하여 결정하도록 하였다. 이 때 축하중전이를 측정하여 말뚝기초의 하중지지거동을 확인하도록 하였다. 그러나, 이와 같은 시험말뚝에 대한 검증시험이 극히 곤란할 경우에는 시공초기에라도 반드시 수행하도록 하였다.

본 현장의 경우 시공초기에 시험말뚝을 시공하여 항타관리기준을 설정하고 말뚝기초의 허용지지력을 결정하기 위하여 시험말뚝에 대한 정재하시험을 실시하였다. 이는 도로교 설계기준에 규정한 지침을 제대로 준수한 사례로 기록될 수 있을 것이다.

기초말뚝의 지지력을 추정하는 수단으로는 정역학적 지지력 공식과 동역학적 지지력공식 등이 제안되어 있으나 이들 방법들은 신뢰도가 낮으며, 정재하시험도 실제와 상이한 조건 하에서 시행되므로 그 방법이나 결과의 해석에 아직 약간의 문제가 남아있기는 하지만 현재의 공학적인 수준으로는 정재하시험을 실시하여 지지력을 확인하는 방법이 신뢰성이 가장 높은 것으로 판단되고 있다 (한국지반공학회, 1997).

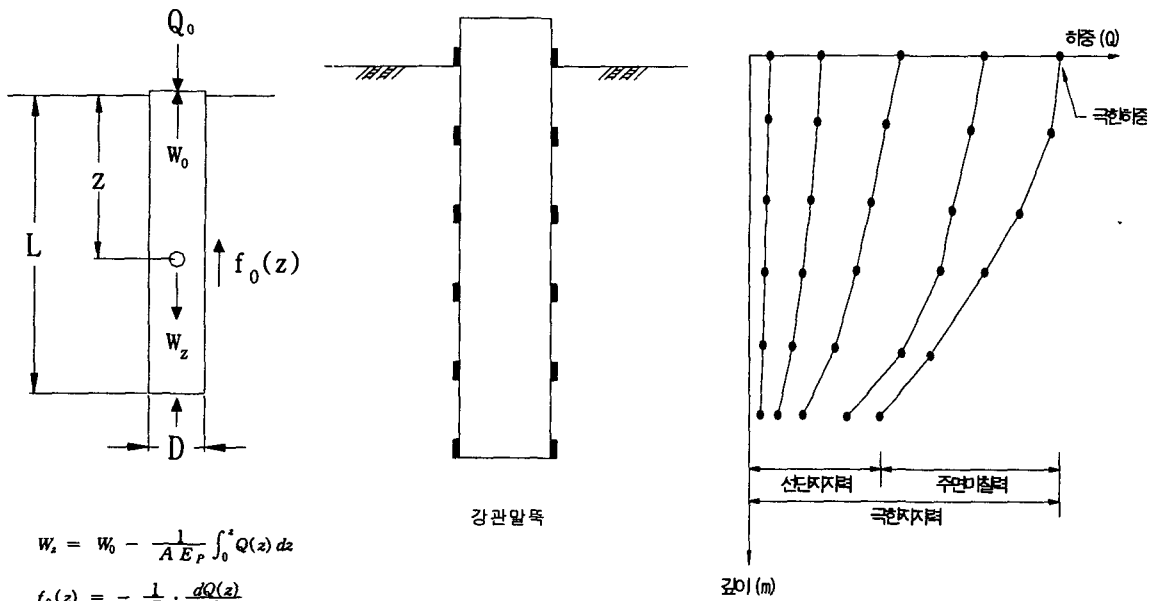
실제 구조물의 경우 무리지어 시공되고 말뚝에 작용하는 하중은 수년 또는 수십 년에 걸친 장기적인 하중이 작용한다. 그러나, 재하시험시에는 1개의 말뚝에 대한 시험일 뿐만 아니라 재하가 단시간에 일시적인 하중으로 작용하므로 실제와는 차이가 있을 수 있다는 점에 유의하여야 한다. 또한, 재하시험은 계획, 실시, 해석과정 등을 제대로 수행해야 필요로 하는 성과를 기대할 수 있다. 그러므로 시험 계획이나

재하시험의 실시는 될 수 있는 한 실제에 가까운 상태에서 수행될 수 있도록 해야 하며 시험 중 측정이나 시험결과 해석은 지중에서의 현상을 제대로 반영할 수 있도록 신중하게 이루어져야 한다. 이와 같은 사항을 고려하여 초기 계획단계에서 시험의 위치, 종류, 방법, 시험말뚝의 시공 등에 대한 자료수집과 검토를 시행하였고 이를 근거로 일정 계획을 수립하여 말뚝재하시험을 시행하였다.

### 3.2 하중전이 해석방법

말뚝과 주변 흙 사이에 발생하는 마찰력은 응력 - 변위 - 시간의 특성, 말뚝 - 흙 시스템 내에 있는 모든 요소의 파괴 특성, 그리고 말뚝의 설치 방법 등에 의해 영향을 받는다 (Vesic, 1977). 하중 전이 해석 방법으로는 다음의 4가지 방법을 들 수 있으며, 여기에서는 가장 확실한 하중전이 해석방법인 실험적인 방법 (최용규, 1989)을 사용하였다. 실험적인 방법에 의한 하중전이 해석의 개념도는 그림 3과 같으며 강관말뚝과 현장타설말뚝에 축하중 계측장치를 부착 또는 매설하여 축하중의 분포를 각 재하단계별로 직접 측정하여야 한다.

- (1) 실험적인 방법
- (2) 하중 전이 함수를 이용한 방법
- (3) 탄성 · 고체 방법
- (4) 유한 요소 해석 방법



$$w_z = w_0 - \frac{1}{AE_p} \int_0^z Q(z) dz$$

$$f_0(z) = - \frac{1}{P} \cdot \frac{dQ(z)}{dz}$$

(a) 하중전이 해석 개요      (b) 축하중 계측장치 설치도      (c) 깊이에 따른 축하중 분포도

그림 3. 실험적인 방법에 의한 하중전이 해석의 개념도

### 3.3 축하중전이 측정

자료집적시스템(data acquisition system)은 말뚝축하중 계측용 센서, 하중 측정용 센서(pressure gauge sensor), 말뚝두부의 변위량 계측장치(LVDT) 등의 센서부와 측정장치(data logger)로 구성되었으며, 측정항목 및 측정에 사용된 계측시스템은 표 2와 같다.

표 2. 측정항목 및 자료 집적시스템

항 목	본 시험의 특징
측정내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>말뚝머리 하중 - 침하량                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 자동측정</li> <li>- 극한지지력(또는 항복지지력) 결정</li> <li>- 설계개념 확인</li> </ul> </li> <li>축하중의 전이특성                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 주변 마찰력과 선단지지력 분리 측정</li> <li>- 지층별 지지능력 측정</li> <li>- 강관응력(또는 하중)</li> </ul> </li> </ul>
계측센서 (시험말뚝)	<ul style="list-style-type: none"> <li>말뚝머리 하중계(4개)</li> <li>말뚝머리 침하계(3개)</li> <li>축하중 계측용 센서</li> <li>반력말뚝의 인발 변위계(2개)</li> </ul>
측정장치	<ul style="list-style-type: none"> <li>자동화 계측 시스템</li> <li>- TDS 302 : 전기저항식 센서 측정 (최대 500채널까지 확장가능)</li> </ul>

#### 4. 말뚝정재하시험 결과 및 분석

##### 4.1 말뚝머리 하중 - 침하량 관계

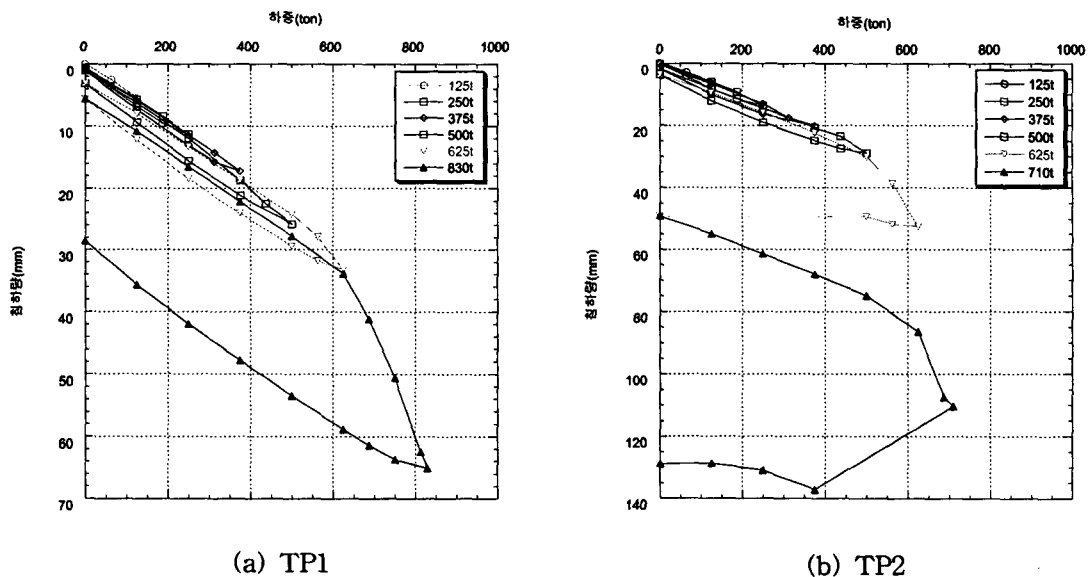


그림 4. 말뚝머리 하중 - 침하량 관계

말뚝정재하시험 결과 말뚝의 극한지지력을 구할 수 있었다. 말뚝머리 하중 - 침하량 관계(그림 4)로부터 항복지지력을 구하여 안전율 2.0을 적용한 허용지지력은 311 ~ 319 ton이었으며, 침하량은 14 ~ 15 mm였다.

TP1의 잔류침하량은 23 mm, TP2의 잔류침하량은 80 mm가 발생하였다. TP2의 경우 최대재하하중 710 ton에서 과도한 잔류침하량이 발생하였는데, 이는 말뚝의 부재파괴현상에 의해 발생한 부재의 소성 변형으로 인해 유발된 침하량으로 이를 지반의 잔류침하량과는 구별하여야 할 것이다.

## 4.2 말뚝깊이에 따른 말뚝축하중 분포도

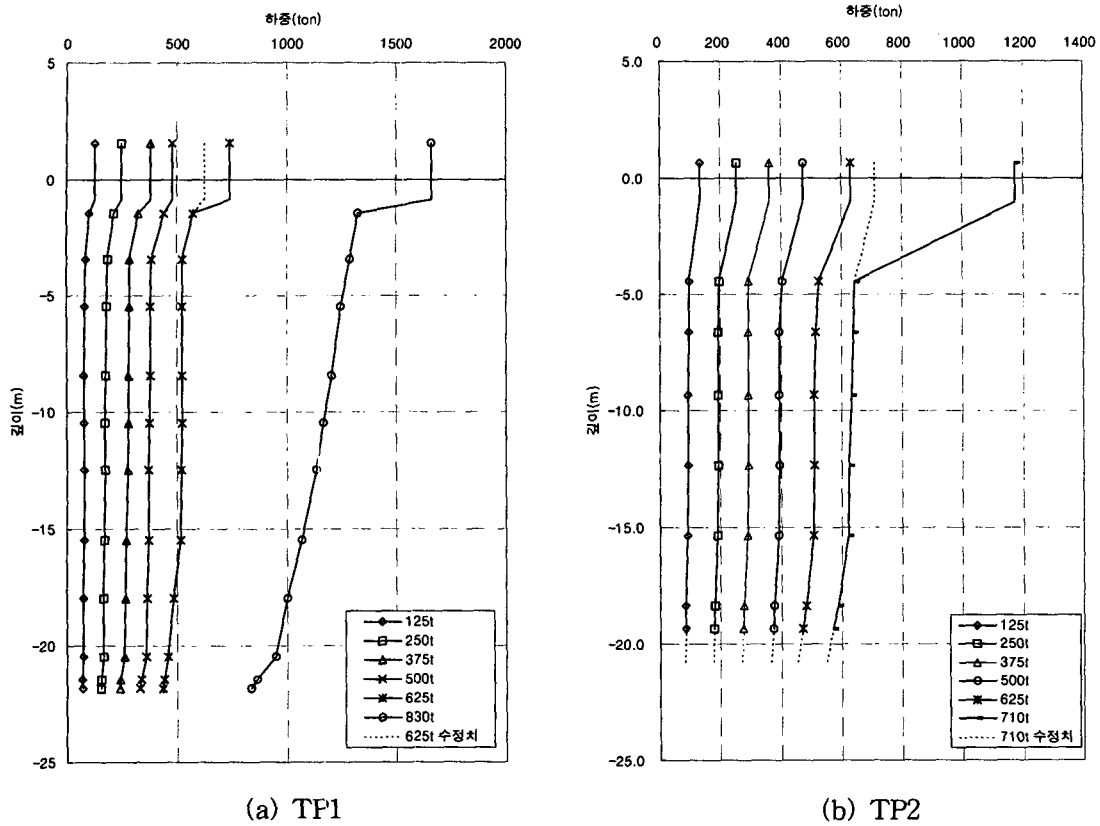


그림 5. 하중단계별 말뚝축하중 분포도

TP1의 축하중 분포도(그림 5(a))로부터 하중재하 6단계(최대하중 830 ton)에서 말뚝부재의 소성변형 거동이 나타나 과도한 변형이 발생하였음을 알 수 있었다. 따라서, 하중재하 6단계에서의 말뚝 두부의 축하중이 재하하중 830 ton보다 훨씬 상회하는 값을 나타냄을 알 수 있었다. 그러나, 이러한 거동은 두 부에서 과도하게 발생하였을 뿐 선단부로 갈수록 주면마찰력의 발현으로 인해 말뚝구조부재에 작용하는 축방향 하중은 크게 줄어들어 강관의 압축응력은 허용치이내에 있는 것을 알 수 있었다. 그림 5(a)에 나타낸 하중재하단계에 따른 말뚝축하중의 분포도에서 항복하중 638 ton일 때의 말뚝의 주면마찰력과 선단지지력을 분리하여 192 ton과 446 ton으로 구하였다. 각 지층에서 발휘된 주면마찰력을 살펴보면, 사질토층에서 99 ton, 점토층에서 4 ton 그리고 자갈층에서 89 ton으로 나타났다.

표 3. 시험결과 분석 요약

시험말뚝	시공위치	항복지지력(ton)		허용지지력(ton)		침하량(mm)	
		(선단지지력 / 주면마찰력)		(선단지지력 / 주면마찰력)		항복하중시	허용하중시
TP1	시점부 인근 집수정	638		319		31	14
		(446 / 192)		(223 / 96)			
TP2	중점부 인근 집수정	621		311		31	15
		(451 / 170)		(225 / 85)			

비고 ; 1) 안전율 2.0을 적용하였음.

TP2의 축하중 분포도(그림 5(b))를 살펴보면 하중재하 6단계(최대하중 710 ton)에서 말뚝의 상부에서

만 소성변형의 거동이 나타나 과도한 변형이 발생하였음을 알 수 있었다. 이 하중단계에서 실제로 말뚝 상부에서 부재파괴가 발생한 것을 관찰할 수 있었다. 따라서, 하중재하 6단계에서 말뚝두부의 측정된 축하중이 실제 재하하중 710 ton보다 훨씬 상회하는 값을 나타냄을 알 수 있었다. 그러나, 이러한 거동은 두부에서만 과도하게 발생하였을 뿐, 지중에 관입된 말뚝길이에서는 주변마찰력의 발현으로 인해 말뚝 축하중이 급격하게 감소하여 구조부재의 압축응력은 허용치 이내에 충분히 들었다. 그림 5(b)에 나타난 하중재하단계에 따른 말뚝축하중의 분포도에서 항복하중 621 ton일 때의 말뚝의 주변마찰력과 선단 지지력을 분리하여 170 ton과 451 ton으로 구하였다. 각 지층에서 발휘된 주변마찰력을 살펴보면, 매립토층에서 46 ton, 사질토층에서 59 ton, 점토층에서 48 ton 그리고 자갈층에서 17 ton으로 나타났다.

### 4.3 PDA 결과 분석

본 현장에서는 4개의 말뚝(시험말뚝 2개, 반력말뚝 2개)에 대한 PDA를 2회씩 수행하여 정재하시험의 시기결정과 항타관리기준설정 그리고 반력말뚝의 인발지지력과 시험말뚝의 개략적인 지지력 결정을 위하여 PDA를 실시하였다. PDA 결과는 아래의 표 4에 요약하였다. PDA로부터 말뚝의 허용지지력은 201 ~ 229 ton으로 예측되었다. 이는 정재하시험 결과에 비해 매우 작은 값으로 나타났으며 PDA만으로 말뚝의 지지력을 예측하는 것은 곤란할 수 있음을 알 수 있었다. 2회씩 수행한 PDA 결과, 말뚝의 허용지지력이 크게 차이가 나지 않았으므로 말뚝시공시 항타로 인해 교란되었던 말뚝주변 지반은 안정된 것으로 판단하고 정재하시험을 실시하였다.

표 4. PDA 결과 요약표

말뚝	시공일자	시험일자	타격횟수 (BN)	최대발생응력 (ton/cm <sup>2</sup> )	항타에너지 (ton · m)	CAPWAP 방법			말뚝의 허용지지력 (ton)
						Ru (ton)	Rs (ton)	Rb (ton)	
TP2의 반력말뚝	2000년 8월 8일	2000년 8월 17일	5	1.76	7.2	402.2	255.2	147.0	201
			74	1.70	8.1	443.9	99.8	344.1	221
		2000년 8월 21일	7	1.65	7.4	404.4	254.2	150.2	202
			20	1.64	6.1	397.5	241.3	156.2	198
TP2	2000년 8월 8일	2000년 8월 17일	7	1.74	7.4	418.6	197.2	221.4	209
			62	1.67	8.1	430.6	232.2	198.3	215
		2000년 8월 21일	13	1.64	6.4	427.8	194.0	233.8	213
			44	1.68	6.5	425.7	190.6	235.0	212
TP1의 반력말뚝	2000년 8월 9일	2000년 8월 17일	6	1.66	6.8	414.7	144.2	270.5	207
			47	1.88	6.6	445.7	75.4	370.3	222
		2000년 8월 21일	7	1.60	6.0	412.5	157.0	255.5	206
			38	1.74	6.3	438.1	130.4	307.7	219
TP1	2000년 8월 9일	2000년 8월 17일	7	1.67	7.0	420.8	240.4	180.4	210
			31	1.88	7.4	459.9	140.5	319.4	229
		2000년 8월 21일	7	1.75	8.0	406.1	214.7	191.4	203
			21	1.83	7.7	453.5	104.0	349.5	226

비고 ; 1) 안전율 2.0을 적용하였음.

### 4.4 APILE<sup>PLUS</sup>에 의한 계산 결과 분석

말뚝해석 전용코드인 APILE<sup>PLUS</sup>는 국내 지반에의 적용성이 검증되지는 않았으나 본 연구에서는 극한 지지력 예측, 주변마찰력과 선단지지력의 분리, 축하중전이 양상의 예측 등을 위하여 APILE<sup>PLUS</sup>를 보조적인 수단으로 사용하였다. APILE<sup>PLUS</sup>에 의한 계산 결과, 말뚝의 극한지지력은 110 ~ 170 ton이었고 주변마찰력 분담률은 대략 95 %정도였다. 이는 정재하시험과 PDA로부터 예측한 지지력과 비교하였을

경우 매우 상이한 예측 결과를 나타내었다.

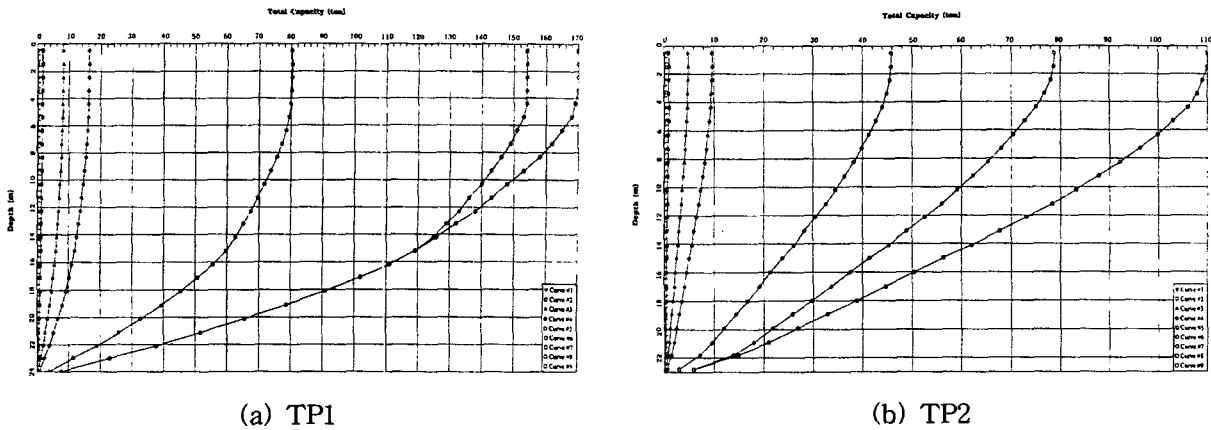


그림 6. 말뚝깊이에 따른 말뚝축하중 분포도

## 5. 결론

- 1) 직경 609.6 mm인 개단강관말뚝에 실시된 하중전이 측정이 수반된 정재하시험 결과 극한지지력을 구할 수 있었으며, 안전율 2.0을 적용할 때 허용지지력은 311 ~ 319 ton이었고, 주변마찰력과 선단 지지력은 각각 85 ~ 96 ton과 223 ~ 225 ton으로 주변마찰력 분담률이 30 %정도인 선단지지말뚝으로 거동하였다.
- 2) 본 현장의 말뚝선단 지지층은 자갈층(GP - GM)이었으며, 따라서 암반층이 아닌 자갈층도 충분한 지지층이 될 수 있음을 알 수 있었다.
- 3) PDA 결과 CAPWAP 방법에 의해 안전율 2.0을 적용할 때 말뚝의 허용지지력은 201 ~ 229 ton이었고 주변마찰력 분담률은 45 %정도였다. PDA로부터 예측한 말뚝의 지지력은 정재하시험의 결과보다 약 33 %만큼 작게 예측되었으므로 PDA만으로 말뚝의 지지력을 예측하는 것은 곤란할 수 있음을 알 수 있었다.
- 4) 말뚝의 연직지지력 해석코드인 APILE<sup>PLUS</sup>에 의한 계산 결과 말뚝의 극한지지력은 약 110 ~ 170 ton이었고, 주변마찰력 분담률은 대략 95 %정도였다. 이는 정재하시험과 PDA로부터 예측한 지지력과 비교하였을 경우 마찰력분담율이 크게 나타났으며, 정재하시험 결과에 비해 1/3 수준이었다.
- 5) 본 현장의 경우 시공초기에 시험말뚝을 시공하여 향타관리기준을 설정하고 말뚝기초의 허용지지력을 결정하기 위하여 시험말뚝에 대한 정재하시험을 실시한 경우로 도로교 설계기준에 규정한 지침을 제대로 준수한 사례이다. 또 설계목적의 하중전이 측정이 수반된 말뚝정재하시험으로부터 지지층의 개념이 견고한 암반층만을 의미하는 것이 아니라 기초로부터 상부의 하중을 안정하게 지지할 수 있는 지반이라면 지지층으로 될 수 있음을 인식하여야 할 것으로 생각되었다.

## 참고문헌

1. 건설교통부 (2000). “도로교 설계기준”
2. 최용규 (1989). “개단강관말뚝의 폐색효과에 관한 실험적 연구”, 서울대학교 대학원 토목공학과 박사학위논문.
3. (사) 한국지반공학회 (1997). “구조물기초 설계기준”
4. Vesic, A. S. (1977). “Design of pile foundations”, National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 42.